

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Měření charakteristiky ventilu na vodní trati

Measurement of Characteristics of the Valve on the Water Line

Student: Miroslava Horáčková

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Marian Bojko, Ph.D.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Zadání bakalářské práce

Student: **Miroslava Horáčková**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení**
Téma: **Měření charakteristiky ventilu na vodní trati**
Measurement of Characteristics of the Valve on the Water Line
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Rešerše odborné literatury zabývající se požadovaným tématem (charakteristika místních ztrát při proudění skutečné kapaliny).
2. Metody měření tlaku a průtoku vody (charakteristika měřidel), měřicí metody.
3. Návrh experimentální měřicí trati k měření charakteristiky ventilu na vodní trati. Umístění měřidel.
4. Realizace měření, vyhodnocení měřených veličin.
5. Vyhodnocení výsledků měření charakteristiky ventilu (grafy, tabulky).

Seznam doporučené odborné literatury:

1. DRÁBKOVÁ, S. a kol. *Mechanika tekutin - učební text*. VŠB-TU Ostrava, 2007. 260 s. ISBN 978-80-248-1508-4.
2. FAJKA, M. *Měření ztrát v nízkotlakém hydraulickém systému s uvažováním hydrostatického tlaku*. Bakalářská práce, VŠB-TU Ostrava, 2015.
3. *Návod k měření místních ztrát*. Online: <http://www.338.vsb.cz/PDF/SKRIPTA01.pdf>
4. JANALÍK, J. *Měření tekutinových mechanismů*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1995. 155 s.
5. JENČÍK, J., KUHN, L. *Technická měření ve strojírenství*. Praha: SNTL Praha, 1982. 580 s.
6. NOSKIEVIČ, J., JANALÍK, J., RÝC, Z., ŠTÁVA, P. *Mechanika tekutin - příručka pro laboratorní cvičení*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1987. 152 s. ISBN-80-03-00308-3.
7. VINOPAL, S., KOLÁŘ, V. *Hydraulika průmyslových armatur*. Praha: SNTL Praha, 1963. 650 s.
8. MILLER, D. S. *Internal Flow Systems*. BHRA (Information Services). 1990. 396p. ISBN 0-947711-77-5.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marian Bojko, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Prohlašuji, že

- jsem byla seznámena s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB – TUO“) má právo nevýdělečné ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB – TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby.

V Ostravě: 16.5.2016

Miroslava Horáčková

Podpis

Jméno a příjmení autora práce: MIROSLAVA HORÁČKOVÁ
Adresa trvalého pobytu autora práce: STARÁ VES U RÝMAŘOVA

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě16.5.2016..

.....Miroslava Horáková.....
podpis

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat panu Ing. Marianu Bojkovi, Ph. D. za ochotnou pomoc a cenné rady při psaní mé bakalářské práce.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

HORÁČKOVÁ, M. *Měření charakteristiky ventilu na vodní trati*: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2016, 48 s. Vedoucí práce: Bojko, M.

Bakalářská práce se zabývá měřením charakteristiky ventilu na vodní trati. V úvodu jsou definovány fyzikální vlastnosti kapalin, charakteristika měření objemového průtoku, charakteristika měření místní rychlosti a charakteristika měření tlaku na vodní trati. V praktické části byla navržena a sestavena experimentální trať, na které následně probíhalo samotné měření. Měřena byla charakteristika kulového ventilu, a to v několika polohách. Měření objemového průtoku a tlakového spádu bylo realizováno na trati s indukčním průtokoměrem a diferenčním tlakoměrem. Výsledky měření charakteristiky kulového ventilu jsou vyhodnoceny pomocí tabulek a grafických závislostí. V závěru jsou výsledky měření diferenčním tlakoměrem porovnány s výsledky měření U – trubicí.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Kulový ventil, U – trubice, Diferenční tlakoměr, Průtok, Tlakový spád, Vodní trať, Experimentální měřicí trať

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

HORÁČKOVÁ, M. *Measurement of Characteristics of the Valve on the Water Line*. Ostrava: VŠB – Technical university of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipment, 2016, 48 s. Thesis head: Bojko, M.

This Bachelor thesis deals with measuring the characteristics of the valve on the water line. In the introduction physical properties of fluids, flow measurement characteristics, the characteristics of measuring the local speed, and characteristics of measuring the pressure at the water line, are defined. In the practical part, the experimental track was proposed, where the subsequent measurement took place itself. The characteristics of the globe valve were measured in several positions. The measurement was carried out on the water line with induction flow meter and a differential pressure gauge. The results of measuring the characteristics of the globe valve were evaluated using tables and graphical relations. In conclusion, the results of differential pressure gauge measurement were compared with the results of U-Tube measurement.

KEY WORDS:

Ball valve, U – tube, differential pressure gauge, flow, pressure drop, water line, experimental test track

Obsah

Seznam použitých značek

1	Úvod.....	10
2	Fyzikální vlastnosti kapalin.....	11
2.1	Hustota (měrná hmotnost) a měrná tíha kapaliny	11
2.2	Viskozita	11
2.3	Objemová stlačitelnost	12
2.4	Definice tlaku	12
3	Charakteristika měření rychlosti, průtoku a tlaku	12
3.1	Charakteristika měření střední rychlosti	12
3.2	Charakteristika měření průtoku	14
3.3	Charakteristika měření místní rychlosti	17
3.4	Charakteristika měření tlaku	18
4	Hydraulické ztráty	22
4.1	Charakteristika třecích ztrát	23
4.2	Charakteristiky místních ztrát	24
5	Řídicí prvky hydraulických systémů.....	25
5.1	Prvky pro hrazení průtoku.....	25
5.2	Prvky pro řízení průtoku	27
5.3	Charakteristika experimentálního měření jednosměrného ventilu na vodní trati.....	28
6	Návrh experimentální měřicí tratě	29
6.1	Použité prvky a jejich specifikace	33
6.2	Postup měření.....	34
7	Průběh měření a vyhodnocení.....	35
7.1	Měření charakteristiky ventilu diferenčním tlakoměrem	35
7.2	Měření charakteristiky ventilu U – trubicí	39
8	Závěr	43
9	Seznam použité literatury.....	45
10	Seznam příloh	45

Seznam použitých značek

Značka	Název veličiny	Jednotka
c	absolutní rychlost	m.s^{-1}
D, d	průměr	mm
e_z	měrná ztrátová energie	J.kg^{-3}
g	gravitační zrychlení	mm^2
h_z	ztrátová výška	m
h	výška hladiny	m
l	délka potrubí	m
m	hmotnost	kg
m_p	hmotnost pístu	kg
m_z	hmotnost závaží	kg
p	tlak	kPa, bar, Pa
p_D	dynamický tlak	Pa
p_C	celkový tlak	Pa
p_S	statický tlak	Pa
p_z	tlaková ztráta v potrubí	bar
Q	průtok	$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$
Re	Reynoldsovo číslo	1
S	průřez	mm^2
S_c	vnitřní průměr clony	m
S_p	vnitřní průměr potrubí	m
t	čas	s
V	objem	m^3
v	rychlost	m.s^{-1}
ρ	hustota	kg.m^{-3}
ρ_m	hustota měrné kapaliny	kg.m^{-3}
τ	smykové napětí	Pa
δ	objemová stlačitelnost	Pa^{-1}
Δh	rozdíl výšek hladiny	m
Δp	rozdíl hodnoty tlaku	Pa
λ	ztrátový součinitel	1
η	dynamická viskozita	Pa.s
ζ	ztrátový součinitel	1
ν	kinematická viskozita	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}, \text{mm}^2.\text{s}^{-1}$

1 Úvod

Cílem bakalářské práce je měření charakteristiky ventilu na vodní trati. Měřeným prvkem je kulový ventil. Kulové ventily se dělí na dvoucestné a trojcestné a slouží k hrazení průtoku kapaliny. Uzavírání, pootevření nebo úplné otevření se provádí podle varianty kohoutu buď manuálně ruční pákou, nebo servopohonem. Pro měření bakalářské práce jsem použila dvoucestný kulový ventil s manuálním ovládáním páky.

První část bakalářské práce obsahuje rešerši týkající se charakteristiky fyzikálních vlastností kapalin, charakteristiky hydraulických ztrát a charakteristiky měření veličin na vodní trati. V těchto kapitolách jsou uvedeny základní vztahy pro výpočet fyzikálních veličin a vztahy pro výpočty hydraulických ztrát. Dále je uvedena charakteristika měření objemového průtoku, charakteristika měření tlaku a charakteristika měření místní rychlosti, včetně prvků pomocí kterých lze tyto veličiny měřit. Dále jsou charakterizovány základní vztahy pro výpočet těchto veličin.

V druhé části práce je uvedena charakteristika experimentálního měření na vodní trati, která se zabývá měřením charakteristiky jednosměrného ventilu se dvěma typy kuželek. Měření je provedeno pro jednosměrný ventil se vstupním průměrem $d = 201 \text{ mm}$ a průměrem sedla $D = 193 \text{ mm}$.

Praktická část bakalářské práce obsahuje návrh a realizaci experimentální tratě pro měření charakteristiky ventilu na vodní trati, včetně schématu a seznamu použitých prvků tratě. Experimentální trať byla navržena za účelem měření charakteristiky kulového ventilu. Charakteristika kulového ventilu byla měřena pro polohy $\alpha_1 - \alpha_{10}$. Objemový průtok byl regulován uzavíracím ventilem, který byl umístěn na konci tratě. Následně jsem hodnoty zapisovala do připravených tabulek. Tlakový spád na měřeném prvku (kulový ventil) experimentální měřicí trať byl měřen snímačem BHV firmy Cressto. Tlakový spád byl měřen před a za kulovým ventilem a výsledné hodnoty z diferenčního snímače tlaku jsem zapsala do tabulky pro odpovídající hodnotu objemového průtoku. Objemový průtok byl měřen indukčním průtokoměrem firmy Elis Plzeň a. s.

Následně jsem použila stávající experimentální měřicí trať a místo diferenčního snímače tlaku jsem použila U – trubici. Výsledky měření diferenčním snímačem tlaku a U – trubicí jsou vyhodnoceny v kapitole osm, a vzájemně porovnány.

2 Fyzikální vlastnosti kapalin

Při výpočtech hydraulických mechanismů, např. při zjišťování tlakových ztrát, je velmi důležité znát základní fyzikální vlastnosti pracovních kapalin. Při nevhodné volbě pracovní kapaliny je velká pravděpodobnost snížení funkce zařízení, případně vliv na životnost zařízení [3]. Stav kapaliny je určen tlakem, hustotou a teplotou, co představují stavové veličiny [11].

2.1 Hustota (měrná hmotnost) a měrná tíha kapaliny

Hustota ρ je rovna poměru hmotnosti elementární částice tekutiny dm k jejímu elementárnímu objemu dV [3], [11]. Hustota je definována pomocí následujícího vztahu.

$$\rho = \frac{dm}{dV} \text{ [kg.m}^{-3}\text{]} \quad (2.1)$$

Hustota kapalin se za normálních podmínek mění s tlakem a teplotou nepatrně. [11]

2.2 Viskozita

Viskozita se projevuje za pohybu skutečných kapalin. Při vzájemném pohybu kapaliny vznikají důsledkem vnitřního tření (viskozity) smyková napětí τ , které brání pohybu. Tečné napětí bývá vyvoláno vnitřním třením neboli viskozitou kapaliny. [11]

Vzorec pro výpočet smykového (tečného) napětí:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} = \eta \frac{v}{h} \text{ [Pa]} \quad (2.2)$$

Kde:

η - dynamická viskozita [Pa.s]

$\frac{dv}{dy}$ - gradient rychlosti ve směru kolmém na směr pohybu

v - rychlost [m.s⁻¹]

Tento vztah je určen pro laminární proudění. [11]

2.3 Objemová stlačitelnost

Stlačitelnost se vyjádří součinitelem objemové stlačitelnosti δ , kdy změna objemu dV , která je vyvolaná změnou tlaku Δp při konstantní teplotě ($T = konst.$) je definována vztahem [11]:

$$\delta = -\frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dp} \right) [Pa^{-1}] \quad (2.3)$$

Kde:

V - objem [m^3]

p - tlak [Pa]

2.4 Definice tlaku

Tlak se řadí mezi stavové veličiny. Šíření tlaku v uzavřené nádobě popisuje Pascalův zákon, který říká, že tlak, který je vyvolán vnější silou v kapalině je ve všech místech stejný a bude se šířit všemi směry stejně. [9]

Tlak je definován silou F působící kolmo na jednotku plochy S :

$$p = \frac{F}{S} = \frac{m \cdot g}{S} [Pa] \quad (2.4)$$

Hydrostatický tlak je určen tlakem sloupce kapaliny o výšce h a hustotě ρ :

$$p = \rho \cdot g \cdot h [Pa] \quad (2.5)$$

3 Charakteristika měření rychlosti, průtoku a tlaku

Mezi nejdůležitější veličiny, které v hydraulice měříme, patří objemový průtok, tlak, střední a místní rychlost. Kromě uvedených fyzikálních veličin lze měřit i další veličiny [11].

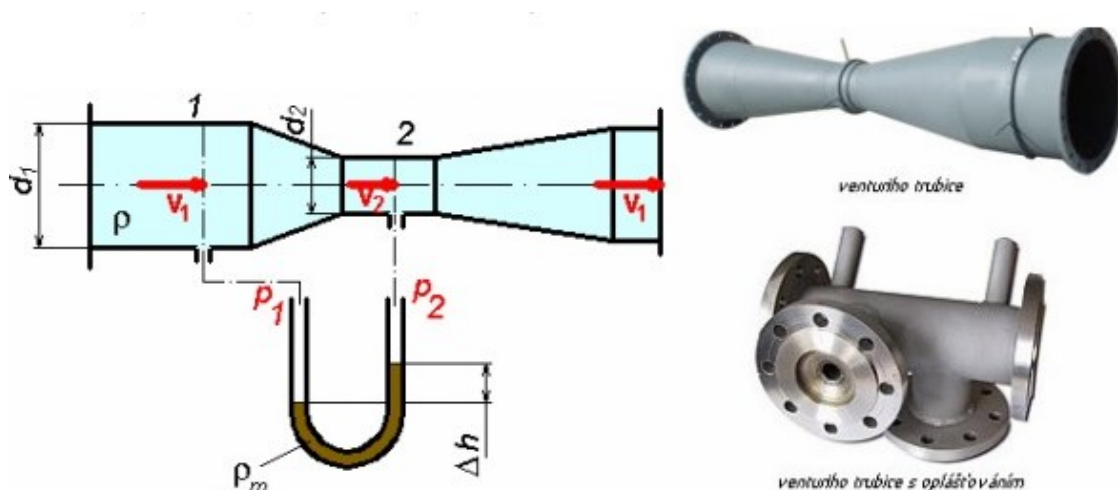
3.1 Charakteristika měření střední rychlosti

Měření střední rychlosti se realizuje pomocí průřezových měřidel, kdy se střední rychlost určuje z tlakového spádu mezi dvěma průřezy [4]. Mezi základní měřidla patří Venturiho trubice, clona nebo dýza [11]. Oba měřené tlaky jsou statické. V zúženém průřezu se zvyšuje rychlost proudící kapaliny a klesá statický tlak, který je úměrný průtokové rychlosti. Pro řešení se aplikuje Bernoulliho rovnice pro dokonalou kapalinu

a rovnice kontinuity. Měřicí zařízení s průřezovým měřidlem tvoří škrticí orgán a diferenční tlakoměr (U – trubice). Největší tlakové ztráty vykazuje clona, nejmenší Venturiho trubice [11].

Venturiho trubice

Venturiho trubice je řazena mezi klasická průřezová měřidla (viz. obr. 3.1). Skládá se ze vstupního konfuzoru (část vedení kapaliny, jež plynule zmenšuje průtočný průřez ve směru proudění, čímž roste rychlost a klesá tlak), krátké válcové části se zúženým průřezem a z delšího difuzoru (část vedení kapaliny s plynule se zvětšujícím průtokovým průřezem, v němž se zmenšuje rychlost proudění kapaliny, a tím se její pohybová energie mění na tlakovou) [11].



Obr. 3.1 Princip Venturiho trubice a průmyslově vyráběné trubice [11]

Clona a dýza

Pro měření střední rychlosti nebo průtoku se častěji používají clony (obr. 3.2) než Venturiho trubice [4]. Clony jsou konstruovány jednoduše, mají vysokou přesnost a jsou výhodnější i z finančního hlediska. Výpočet parametrů clony určuje norma ČSN ISO 5167- 1. Clony a dýzy jsou konstantní hydraulické odpory, které plní v obvodu z hlediska řízení spíše pomocné funkce [11].



Obr. 3.2 Schéma clony a průmyslově vyráběná centrická a excentrická clona [11]

Clona (obr. 3.2) je kroužek, jehož otvor má menší průměr než je světlost potrubí. Tím se průtokový průřez zúží v následujícím poměru [11]:

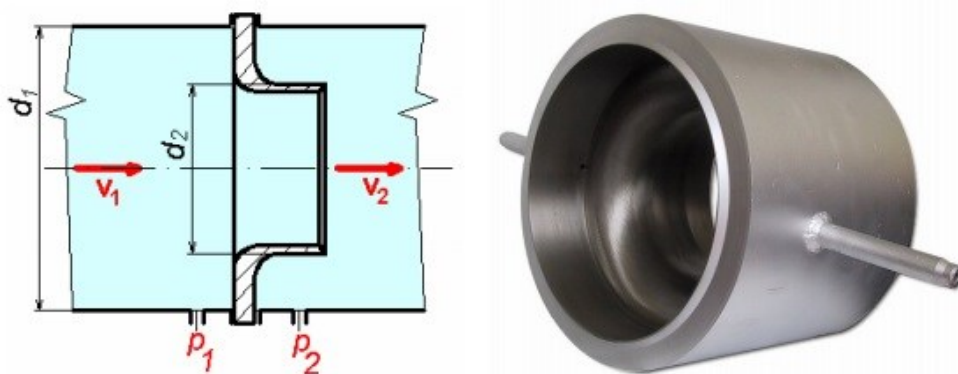
$$m = \frac{S_c}{S_p} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \quad (3.1)$$

Kde:

S_p - vnitřní průměr potrubí [m] – odpovídá d_1

S_c - vnitřní průměr clony [m] – odpovídá d_2

Podobně je to u dýzy, viz obr. 3.3.



Obr. 3.3 Schéma dýzy a průmyslově vyráběná dýza [11]

3.2 Charakteristika měření průtoku

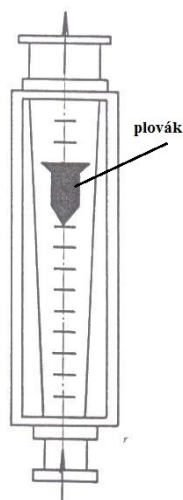
Pro měření objemového průtoku kapalin existuje řada přístrojů, které využívají různé fyzikální principy [11]. Existují:

- **Objemová měřidla** – slouží k měření objemu kapaliny v odměrné nádobě. Měřidla jsou založena na cyklickém plnění a vyprazdňování odměrných prostor. Mezi objemová měřidla patří:
 - Pístový průtokoměr
 - Membránový průtokoměr

- **Průtokoměry s měřením tlakové difference** – jsou založeny na principu zúžení průtočného průřezu. Průtokoměry se snímá rozdíl statických tlaků diferenčním snímačem tlaku před a za zúžením. Typy průtokoměrů:
 - Rychlostní sondy
 - Průřezová měřidla
 - Kapilární průtokoměr
- **Další typy:**
 - Rotametry
 - Průtokoměry lopatkové
 - Průtokoměry indukční

Plovákový průtokoměr

Plovákový průtokoměr neboli rotametr je měřidlo, které funguje na principu měření průtočného množství kapaliny změnou průtočné plochy při stálém tlaku. Jeho konstrukce je tvořena ze svislé skleněné kuželové trubice, ve které je umístěn plovák (obr. 3.4), který je nadnášen protékající kapalinou a jeho poloha závisí na velikosti průtoku, který se odečítá ze stupnice skleněné trubice [11].



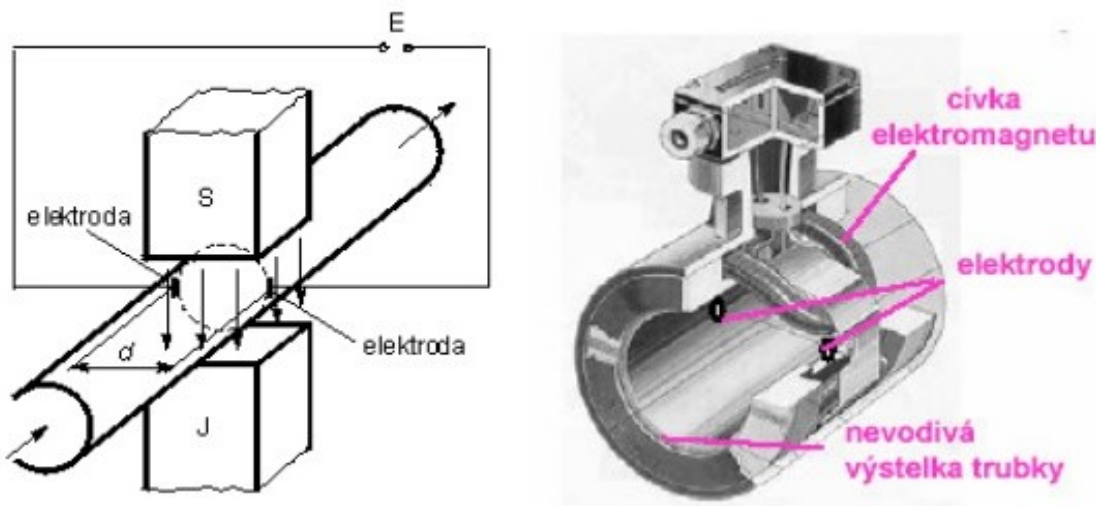
Obr. 3.4 Plovákový průtokoměr [11]

Indukční průtokoměr

Indukční průtokoměr (viz. obr. 3.5) je založen na Faradayově elektromagnetickém zákonu. Čidlo se skládá z nemagnetické a nevodivé trubky, v níž jsou kolmo na směr magnetických siločar zabudovány dvě měřicí elektrody pro snímání indukovaného napětí [4], [11].

Magnetická indukce a vzdálenost elektrod je konstantní pro danou dimenzi čidla. Indukované napětí na snímacích elektrodách je přímo úměrné rychlosti proudění kapaliny v trubici. Objemový průtok Q je násobkem rychlosti v proudění a průřezu trubice S [11].

$$Q = v \cdot S \quad (3.2)$$



Obr. 3.5 Schéma a popis indukčního průtokoměru [11]

V této práci jsem pro měření průtoku použila indukční průtokoměr firmy ELIS Plzeň a. s. (viz obr. 3.6) s následujícími parametry (viz. tab. 3.1).

<u>Indukční průtokoměr</u>	
Výrobce:	Elis Plzeň a.s.
Typ:	FLONET FN 2014
Příkon:	10 W
Jmenovitá světlost:	DN 32
Objemový průtok:	$Q_{min} = 0,3 \text{ m}^3/\text{h}$ $Q_{max} = 30 \text{ m}^3/\text{h}$
Teplota měřené kapaliny:	Do 150°C

Tab. 3.1 Parametry indukčního průtokoměru



Obr. 3.6 Indukční průtokoměr Elis Plzeň a. s.

3.3 Charakteristika měření místní rychlosti

Měření místní rychlosti se nejčastěji realizuje pomocí rychlostních sond např. Pitotova trubice, Prandtlůva trubice [11].

Pitotova trubice

Touto trubicí se určuje místní rychlost proudění tekutiny v určitém místě proudu [11]. Trubice (měřidlo) se nejčastěji používá v leteckém průmyslu, konkrétně jako rychloměr. Pro výpočet místní rychlosti se používá Bernoulliho rovnice [4]. Charakteristika Pitotovy trubice je znázorněna na obr. 3.7. Pro výpočet platí následující vztah:

$$p_c = p_D + p_s, \quad p_c = \frac{1}{2} \rho v^2 + p_s \quad (3.3)$$

Kde:

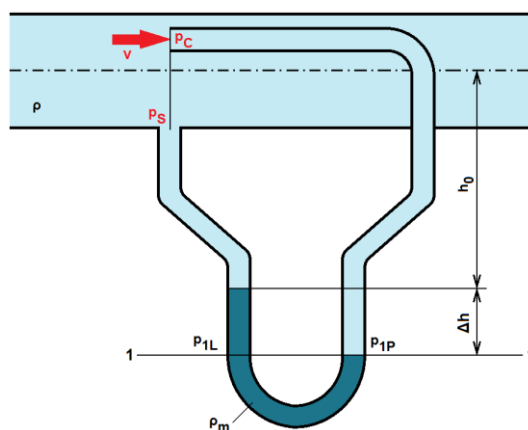
p_s - statický tlak [Pa]

p_D - dynamický tlak [Pa]

p_c - celkový tlak, který měří Pitotova trubice [Pa]

v - rychlost [$m.s^{-1}$]

Jelikož Pitotova trubice měří pouze celkový tlak, proto musíme ještě měřit statický tlak jiným způsobem [4], např. piezometrickou trubicí. Dosáhneme-li vyššího tlaku, použijeme připojení na diferenční tlakoměr, např. U-trubicí (viz. obr. 3.7), ve které je kapalina o hustotě $\rho_m > \rho$ [4].



Obr. 3.7 Pitotova trubice s napojením na U - trubicí [4]

Pak je dynamický tlak definován vztahem: $p_D = p_c - p_s = \frac{1}{2} \rho v^2 = \Delta h (\rho_m - \rho) g$

Kde:

p_D - dynamický tlak $[Pa]$

p_C - celkový tlak $[Pa]$

p_S - statický tlak $[Pa]$

v - rychlost $[m.s^{-1}]$

Δh - rozdíl výšek hladiny $[m]$

g - tíhové zrychlení $[m.s^{-2}]$

ρ_m - hustota měrné kapaliny $[kg.m^{-3}]$

Pak platí vztah pro místní rychlost

$$v = \sqrt{2 \frac{p_C - p_S}{\rho}} = \sqrt{2g\Delta h \frac{\rho_m - \rho}{\rho}} \quad (3.4)$$

$$\Delta h = h_1 - h_2 \quad (3.5)$$

3.4 Charakteristika měření tlaku

Měření tlaku se provádí měřidly tzv. tlakoměry [9]. Základní rozdělení měřidel tlaku včetně rozsahu měřidel je uvedeno v tabulce (obr. 3.8) [9]. Jsou určeny k přesnému měření rychlých a středních tlaků.

Druhy tlakoměrů	Rozsah měření
Pistové: <ul style="list-style-type: none"> klasické digitální tendenční (průmyslové) 	<ul style="list-style-type: none"> – 3 kPa až 2 GPa – 5 kPa až 25 MPa 0,1 až 5 MPa
Deformační: <ul style="list-style-type: none"> trubicové (Bourdonské) membránové krabicové vlnovcové 	<ul style="list-style-type: none"> do 200 MPa (až 2 GPa) do 3 MPa do 200 kPa do 500 kPa
Kapalinové: <ul style="list-style-type: none"> U-trubicové nádobkový se šikmou trubicí zvonové prstencové 	<ul style="list-style-type: none"> do 20 kPa (náplň H₂O) do 250 kPa (náplň Hg) do 100 kPa (náplň H₂O) do 5 kPa (náplň H₂O) do 500 Pa do 25 kPa
Převodníky tlaku: <ul style="list-style-type: none"> odporové indukční kapacitní piezoelektrické rezonanční světlovodné 	<ul style="list-style-type: none"> do 50 MPa do 25 MPa do 40 MPa do 100 MPa do 50 MPa od 0,1 mPa do 1 MPa
Barometry:	od 80 do 115 kPa
Vakuometry:	do 10 μPa (10 ⁻⁵ Pa)

Obr. 3.8 Typy tlakoměrů a rozsahy měřidel tlaku [9]

V této práci jsem měřila tlakový spád diferenčním tlakoměrem Cressto SHD 511 P5UB D. Pro další měření jsem použila kapalinový tlakoměr (U – trubici, viz obr. 3.10).

Kapalinové tlakoměry

Měřený tlak se zde odečítá jako rozdíl výšek hladin kapaliny v trubici. Nejčastěji používaná kapalina v trubicích je voda, rtuť, líh, či kombinace těchto kapalin. Dělíme je tedy na jednokapalinové a dvoukapalinové. U dvoukapalinových tlakoměrů mají kapaliny různou hustotu, aby nedošlo k jejich smíchání (voda-rtuť) [4].

Dále tlakoměry lze dělit podle orientace trubic a to na svislé nebo šikmé. Měřidlo může mít dvě trubice (U-trubicový tlakoměr) nebo nádobku a trubici, kde nádobka nahrazuje druhou trubici (nádobkový tlakoměr). Existuje varianta nádobkového tlakoměru se sklopným ramenem, díky kterému můžeme dosáhnout větší citlivosti přístroje [11].

U – trubicový tlakoměr

U – trubicový tlakoměr je skleněná trubice tvaru U, která má dvě svislé větve (viz. obr. 3.10). Používá se k měření podtlaků, tlakových diferencí a přetlaků. Nejjednodušší variantou tohoto měřidla je U - trubice z poloviny naplněna měřicí kapalinou (viz. obr. 3.10). Kapalina se ustálí ve stejné výšce, jestliže jsou oba konce trubice otevřeny do ovzduší. V případě přivedení vyššího tlaku do levého ramene, kapalina se zde stlačí ($p_1 > p_2$) a hladina poklesne. Zároveň se hladina v pravém rameni ustálí ve větší výšce. [4]

Rozdíl tlaku se vypočte:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = h(\rho_m - \rho)g \text{ [Pa]} \quad (3.6)$$

Kde:

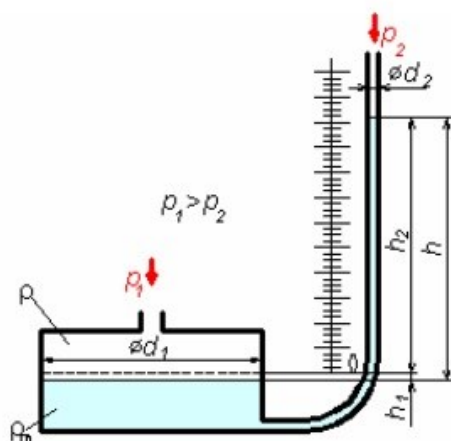
Δh - rozdíl výšek hladin [m]

Δp - rozdíl velikosti tlaku [Pa]

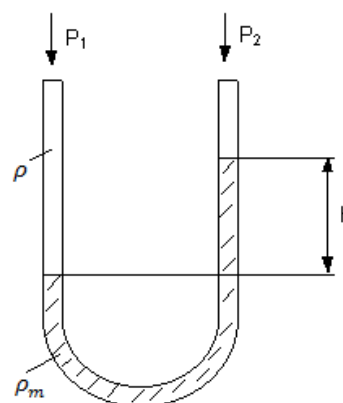
ρ - hustota kapaliny v trubici [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

g - tíhové zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

Nejpoužívanější délka stupnice tlakoměru je 300 - 500 mm. Sloupec vody o výšce 10 mm pak odpovídá tlaku cca 100 Pa. Tento tlakoměr je levný a velmi jednoduchý na použití. V případě praktického měření potřebujeme pouze odběrová místa na měřicí trati.



Obr. 3.9 Schéma nádobkového tlakoměru [11]



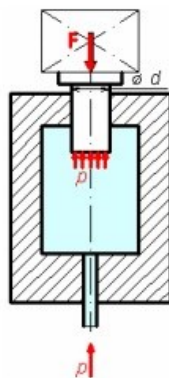
Obr. 3.10 U - trubice

Nádobkový tlakoměr

Je podobný U - trubicovému tlakoměru, s jednou změnou. Jedno rameno je nahrazeno nádobkou, která má větší průměr, než je průměr trubice (viz. obr. 3.9). Hladina v nádobě kolísá velmi nepatrně. Malý pokles hladiny v nádobě se projeví velkým výstupem hladiny v trubici. Výhodou je odečítání výšek sloupce kapaliny na jedné trubici. Pokles hladiny v nádobě se musí zahrnout do stupnice tlakoměru. Existuje také nádobkový tlakoměr se sklopnou trubicí [4].

Pístové tlakoměry

Jedná se o etalonové tlakoměry. Podstatnou součástí je píst (viz. obr. 3.11) přesného průřezu umístěný ve válci. Tlak na píst opatřený talířem se přenáší olejem, kterým je celý systém tlakoměru vyplněn. Velikost síly vzniklé působením tlaku na píst je nahrazena tíhou pístu a závaží. Rovnováha mezi silou závaží a tlakem oleje na píst nastává při pozastavení pohybu pístu ve směru jeho osy. U provozních pístových tlakoměrů je kompenzační síla tvořená pružinou. Lze přidat přídavné závaží. [4]



Obr. 3.11 Princip pístového tlakoměru [11]

Velikost tlaku p působícího na píst je dán vztahem [11]:

$$p = \frac{m_p + m_z}{\frac{\pi d^2}{4}} g \quad (3.7)$$

Kde:

m_p, m_z - hmotnost pístu a závaží $[kg]$

d - průměr pístu $[m]$

g - tíhové zrychlení $[m.s^{-2}]$

Deformační tlakoměry

Princip deformačních tlakoměrů je založen na pružné deformaci a tím na změně geometrického tvaru vhodných tlakoměrných prvků vlivem působení měřeného tlaku. Toto namáhání musí být v rozsahu daných pružných deformací. Nejčastěji používanými deformačními členy jsou Bourdonova trubice, krabice a vlnovec [4].

Elektrické tlakoměry

Elektrické tlakoměry využívají principu tlakové závislosti elektrických veličin. Jedná se o moderní snímače doplněné elektronickými vyhodnocovacími obvody. Umožňují měření absolutního a diferenčního tlaku. Tlak kapaliny působí na membránu snímače a je převeden pomocí piezoelektrických, magnetických nebo indukčních senzorů na elektrický impuls odpovídající naměřené hodnotě tlaku. Mezi elektrické tlakoměry se řadí odporové, kapacitní a piezoelektrické tenzometry. [11]

V bakalářské práci jsem pro měření tlakové difference použila snímač SHD využívající piezoelektrického jevu. Piezoelektrický jev spočívá v tom, že uvnitř některých dielektrik vzniká vlivem mechanické deformace polarizace, která vede ke vzniku elektrického náboje. Měřicí membrána je vyrobena z křemíku a je od měřené kapaliny oddělena nerezovou membránou a olejovou náplní. Tato čidla se vyznačují chemickou odolností. Jsou použita dvě tlaková čidla s rozsahem odpovídající souhlasnému tlaku snímače [11].

Druhým měřidlem byla U – trubice (viz. obr. 3.10), kterou jsem použila pro další měření a pro porovnání se snímačem SHD.

4 Hydraulické ztráty

Obecné proudění kapalin je popsáno těmito rovnicemi: [4]

- Rovnice kontinuity
- Navier – Stokesovy pohybové rovnice – popisují proudění Newtonovské kapaliny, vyjadřují rovnováhu sil
- Bernoulliho rovnice

Rovnice jsou definovány v prostoru a mohou být závislé na čase.

Pro proudění skutečné tekutiny, na kterou působí jen tíhové zrychlení $a=-g$, má Bernoulliho rovnice tvar:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gh_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gh_2 + e_z \quad (4.1)$$

$$e_z = gh_z \quad (4.2)$$

Kde:

e_z - měrná ztrátová energie [$J.kg^{-1}$]

h_z - ztrátová výška [m]

Pokud má potrubí konstantní průřez, tak platí $v_1=v_2$. V tomto případě lze Bernoulliho rovnici zjednodušit na tvar [4]:

$$\frac{p_1}{\rho} + gh_1 = \frac{p_2}{\rho} + gh_2 + gh_z \quad (4.3)$$

V rovnici uvažujeme třecí ztráty a součet místních ztrát $\Sigma\zeta$. Celkový ztrátový součinitel zahrnuje třecí i místní ztráty [4]. Platí následující vztah:

$$\zeta_c = \lambda \frac{l}{d} + \Sigma\zeta = \lambda \frac{l + \Sigma l_e}{d} \quad (4.4)$$

$$e_z = \zeta_c \frac{v^2}{2} \quad (4.5)$$

Místní ztráty lze vyjádřit ekvivalentní délkou, kterou místní ztráty nahrazujeme. Platí následující vztah [4]:

$$\Sigma l_e = \Sigma\zeta \frac{d}{\lambda} \quad (4.6)$$

Charakteristika potrubí

Charakteristiku potrubí vyjadřujeme, jako závislost tlakového spádu Δp na objemovém průtoku Q . Platí následující vztah [4]:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \rho g(h_2 - h_1) + \rho \frac{\zeta_c}{2} \left(\frac{4}{\pi d^2} \right)^2 Q^2 \quad (4.7)$$

Dále platí:

$$\Delta p = R \cdot Q^2 \quad (4.12)$$

Kde:

R - koeficient proti pohybu

Tlaková ztráta je úměrná druhé mocnině průtoku Q .

4.1 Charakteristika třecích ztrát

Třecí ztráty závisí na délce potrubí [11]. Jsou závislé na režimu proudění, tj. na velikosti hodnoty Reynoldsova čísla [11]. Velikost tlakové ztráty nebo ztrátové výšky můžeme analyticky odvodit. Měrnou ztrátovou energii určíme z následující Darcy – Weisbachovy rovnice [4]:

$$e_z = gh_z = \zeta \frac{v^2}{2} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2} \quad (4.8)$$

Kde:

ζ - ztrátový součinitel [1]

λ - třecí součinitel [1]

l - délka potrubí [m]

d - průměr potrubí [m]

Proudění dělíme na laminární a turbulentní. O druhu proudění rozhoduje Reynoldsovo číslo. Čím je hodnota Reynoldsova čísla vyšší, tím nižší je vliv třecích sil částic tekutiny na celkový odpor. Při laminárním proudění je hodnota $Re < 2320$ a třecí součinitel je definován vztahem [11]:

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{64}{\frac{vd}{v}} \quad (4.9)$$

Turbulentní proudění ($Re > 2320$) má tečné napětí větší, a tedy i třecí ztráty jsou vyšší než při proudění laminárním. Součinitel tření λ je kromě Reynoldsova čísla závislý i na relativní drsnosti [11].

4.2 Charakteristiky místních ztrát

Při proudění tekutiny potrubím vznikají místní ztráty v úsecích potrubí, kde se mění charakter proudění (změna směru, změna rychlosti proudění) [4]. V těchto částech potrubí dochází k víření, odtržení proudu tekutiny od stěny, následnému rozptylu energie a změně vektoru rychlosti, díky kterému vznikají místní ztráty. Velikost místních ztrát závisí na tvaru a typu dané části potrubí a také na jejím konstrukčním provedení. [4]

Nejčastěji používané části potrubí, kde dochází k místním ztrátám:

- Tvarové potrubí (kolena, spojky, odbočky, difuzory, T-kusy)
- Armatury (šoupátka, kohouty, ventily, klapky)
- Měřicí zařízení (vodoměry, clony, dýzy)
- Ostatní (filtry, chladiče)

Správné určení místních ztrát jednotlivých prvků potrubí je důležité pro správnou funkci potrubního systému a čerpadla, pomocí něhož přivádíme do systému kapalinu pod tlakem a určitou rychlostí. V extrémním případě může dojít k tomu, že odpory vodní trati budou tak velké, že čerpadlo přes tyto odpory tekutinu neprotlačí [4], [11]. Velikost místních ztrát se určuje podobně jako třecí ztráta pomocí ztrátové energie:

$$e_z = gh_z = \frac{p_z}{\rho} = \zeta_m \frac{v^2}{2} \quad (4.10)$$

Ztrátový součinitel ζ_m závisí na typu místních ztrát, drsnosti stěn, konstrukčním provedení, tvaru rychlostního profilu a režimu proudění. Jeho velikost určujeme ve většině případů experimentálně. V jednoduchých případech můžeme ztrátový součinitel odvodit analyticky. Místní ztráty v potrubí můžeme vyjádřit ekvivalentní délkou potrubí l_e , kdy třecí ztráta v potrubí musí být stejná jako ztráta místní [4], [11].

Tlakový spád pro místní odpory se určuje vztahem:

$$\Delta p = \rho \zeta \frac{v^2}{2} = \frac{\rho \cdot \zeta \cdot Q^2}{2 \cdot S^2} \quad (4.11)$$

tedy:

$$\Delta p = R \cdot Q^2 \quad (4.12)$$

Pro kruhový průřez platí:

$$R = \frac{8 \cdot \rho \cdot \zeta}{\pi^2 \cdot d^4} \quad (4.13)$$

5 Řídicí prvky hydraulických systémů

V hydraulickém obvodu tvoří logickou jednotku jakýkoli regulační prvek. Hydraulické regulační armatury můžeme dělit dle několika základních kritérií. Řídicí prvky nejčastěji dělíme dle principu regulace, a to do základních skupin- prvky pro hrazení průtoku, řízení tlaku, řízení velikosti průtoku. Armatury také dělíme dle media, pro které jsou určeny. Armatury se liší zejména dimenzí a použitým materiálem a tvarem regulačního orgánu. [7]

5.1 Prvky pro hrazení průtoku

Jedná se o prvky, které slouží k uzavření či odklonění proudu media do jiného směru [7]. Mezi prvky pro hrazení průtoku patří kulové ventily, jednosměrné ventily, uzavírací ventily aj.

Kulové ventily

Ručně ovládané kulové ventily většinou nejsou regulačního charakteru, ale plní spíše údržbovou funkci, a to tak, že se kohout uzavře a provede se údržba větve či celků. Tyto ventily jsou nejčastěji dvoucestné. Nejsou příliš vhodné pro rozvody vody v zimním období. Hrozí, že v kulové uzavírací části zůstane voda, ta zde zamrzne a následně může způsobit zničení armatury [7].

Regulace objemového průtoku je umožněna axiální rotací koule s otvorem. Kapalina proudí oběma směry, ale doporučený směr proudění vody je na těle armatury. Při plně otevřeném ventilu nevznikají žádné výrazné hydraulické ztráty, to vede k nepříznivé charakteristice tohoto ventilu. Někteří výrobci proto přidávají plastické clony z šedé nebo tvárné litiny. Pro menší dimenze jsou kohouty připojovány závitem vnějším nebo vnitřním. Pro větší dimenze se používají příruby. Přírubové kulové kohouty nejsou tak časté jako závitové, většinou se dává přednost uzavírací klapce [7], [4], [11].

Výrobci uvádí několik řad modelů, například Giacomini jako jeden z hlavních distributorů uvádí základní řadu R205D, která je určena pro rozvod vody, další řady jsou určené pro pitnou vodu, plyny a agresivní media. Giacomini uvádí rozsah dimenzí od DN 8 a teploty mezi 40°C až 185°C při tlakové odolnosti 42 Bar.

Mezi další větší výrobce kulových ventilů patří Ivars. Jeho hlavní řadou je Perfekta FIV. Vyznačující se dimenzí mezi DN 15 až DN 50 přičemž tlaky se pohybují mezi 20 - 40 Bar a teploty uvádí v rozsahu od -20°C do 130°C . [7]

Jednosměrné ventily

Jednosměrné ventily, nazývané též zpětné ventily, jsou prvky umožňující volný průtok kapaliny jedním směrem a samočinné přehrazení průtoku při změně směru průtoku. V průtočném směru se vyžaduje minimální odpor (tlaková ztráta). V neprůtočném směru se pak vyžaduje dokonalá těsnost. [1]

Uzavírací ventily

Uzavírací ventil slouží k hrazení průtoku v obou směrech. Má dvě funkční polohy: otevřenou a uzavřenou. Neslouží k řízení průtoku, mezipolohy se proto nevyužívají. V uzavřeném stavu by měl být dokonale těsný i při plném protitlaku. V otevřeném stavu by měl klást minimální odpor proti proudění. Ztrátový součinitel ventilu ζ je zanedbatelný, proto je velmi vhodný k použití do sacích potrubí. Konstrukcí uzavíracích ventilů je velký počet. Většinou se jedná o sedlové ventily, které jsou ovládané z bezpečnostních důvodů, ručně. [1]

Rozváděče

Rozváděče slouží k jednoduchému a dostatečně rychlému řízení směru pohybu hydromotorů. Obvykle zajišťují pohyb hydromotoru ve dvou směrech (tam a zpět u přímočarých motorů, otáčení vlevo – vpravo u rotačních motorů) a zastavení hydromotoru, aniž by zajišťovaly funkci řízení rychlosti pohybu. Rozváděče se dělí podle počtu cest (vstupů a výstupů) které se propojují na dvoucestné, třicestné, čtyřcestné, pěticestné atd. Dále se dělí podle počtu funkčních poloh na dvoupolohové, třípolohové atd. Příklady jsou uvedeny v literatuře [1].

Existují:

- a) Rozváděče šoupátkové
- b) Rozváděče sedlové

5.2 Prvky pro řízení průtoku

Škrticí ventily

Škrticí ventily jsou proměnné hydraulické odpory, které umožňují řídit průtok v širokém rozsahu změnou průtočného průřezu na základě uvedeného vztahu:

$$Q = \mu \cdot S_t \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad (5.1)$$

Zatímco závislost objemového průtoku Q na průtočném průřezu S_t je lineární. Závislost objemového průtoku na tlakovém spádu je nelineární. Průtokový součinitel μ je závislý na Reynoldsově čísle Re , dále na protitlaku za ventilem a na geometrii ventilu podobně jako u clony. Nabývá hodnot $\mu = 0,68 \div 0,78$ [1].

Regulátory průtoku

Regulátor průtoku zajistí to, že průtok ventilem není závislý na tlakovém spádu ventilu, ale je konstantní ($Q = konst.$). Přitom platí rovnice pro průtok ventilem [1]:

$$Q = \mu \cdot S_t \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} = konst. \quad (5.2)$$

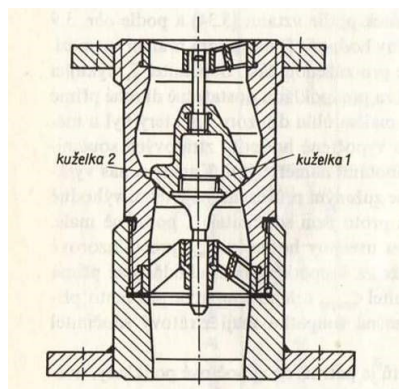
Je zřejmé, že při změně tlaku Δp na ventilu se současně musí měnit průtočná plocha S_t tak, aby se průtok nezměnil. Zvětšení Δp musí být vykompenzováno zmenšením průtočné plochy S_t a opačně. To je zajištěno zvláštní konstrukcí regulačního ventilu [1].

Děliče průtoku

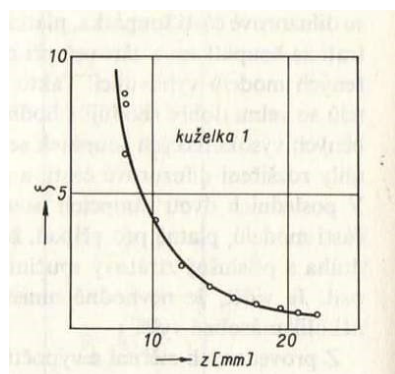
Děliče průtoku slouží k rozdělení objemového průtoku na dva stejné průtoky vedené ke dvěma hydromotorům. Zajišťují tak stejné rychlosti pohybu dvou hydromotorů stejných geometrických objemů při jejich nestejném zatížení. Nahrazují tak zapojení dvou paralelně řazených hydromotorů s předřazenými dvoucestnými regulátory objemového průtoku. Dělič průtoku je levnější než dva dvoucestné regulátory objemového průtoku. Je to dáno tím, že místo řídicích škrticích ventilů má dvě stejné clonky. Ty plní úlohu měření objemového průtoku. Při nestejných průtocích na nich vzniká rozdílný tlakový spád, který se projeví nestejnými tlaky p_1 a p_2 [1].

5.3 Charakteristika experimentálního měření jednosměrného ventilu na vodní trati

Přímé měření charakteristiky jednosměrného ventilu lze provést v laboratořích pouze do takových jmenovitých světlostí podle toho, jak to dovolí zkušební čerpadlo. U jednosměrného ventilu do svislého potrubí je potřeba počítat s dostatečnou délkou svislého potrubí pro zklidnění proudu. [8]



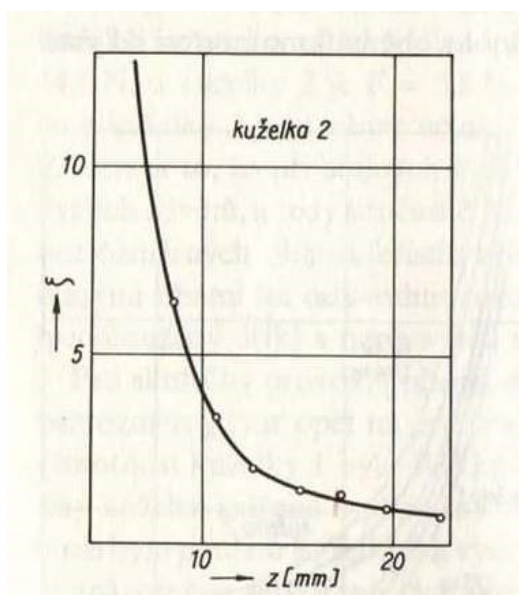
Obr. 5.1 Model zpětného ventilu do svislého potrubí se dvěma typy kuželek [8]



Obr. 5.2 Ztrátový součinitel ζ modelu zpětného ventilu s kuželkou 1 v závislosti na zdvihu z [8]

Na obrázku 6.1 je model zpětného ventilu do svislého potrubí se dvěma typy kuželek. Model je určen pro jednosměrný ventil se vstupním průměrem $d = 201 \text{ mm}$ a průměrem sedla $D = 193 \text{ mm}$ pro vodu o tlaku $29,4 \text{ MPa}$ a teplotě 190°C (měrná hmotnost $\rho = 900 \text{ kg.m}^{-3}$). Maximální hmotnostní průtok skutečným ventilem je $Q_m = 320 \text{ t.h}^{-1}$, což odpovídá maximální rychlosti vody na vstupu ventilu $c = 312 \text{ m.s}^{-1}$. Měření bylo provedeno pro dva typy kuželek. Za daných pracovních podmínek vzniká obtíž projevující s kmitáním kuželky, vedoucí k havárii. Na modelu zpětného ventilu v měřítku zmenšení 3:1 byly změřeny charakteristiky jednosměrného ventilu při proudění vody, nutné pro posouzení funkce. Model byl měřen na vodní měřicí trati tak, že první řadou měření byla zjišťována

závislost ztrátového součinitele na zdvihu kuželky $f = \zeta(z)$ při jednotlivých pevně nastavených zdvích kuželky, přičemž při každém zdvihu byl ztrátový součinitel měřen v určitém rozsahu Re (viz obr. 6.2 a obr. 6.3) [8].

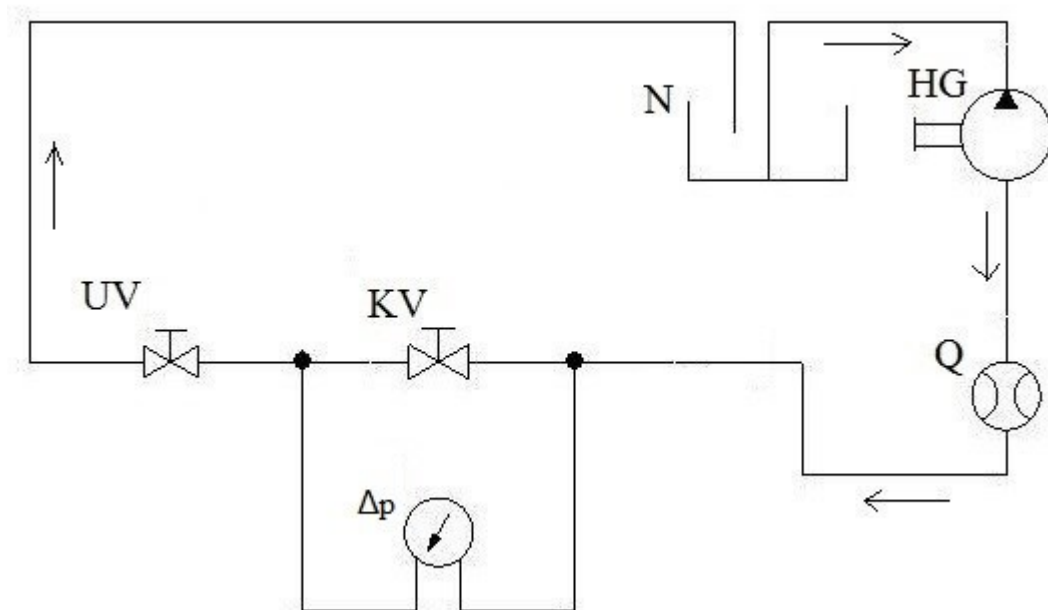


Obr. 5.3 Ztrátový součinitel ζ modelu zpětného ventilu s kuželkou 2 v závislosti na zdvihu z [8]

6 Návrh experimentální měřicí tratě

Cílem bakalářské práce je měření charakteristiky ventilu na vodní trati. Určení charakteristiky je spojováno s měřením tlakového spádu a objemového průtoku pro různé polohy nastavení ventilu. Výsledné hodnoty experimentálního měření jsou následně vyhodnoceny graficky. Nejdříve jsem provedla návrh měřicí experimentální tratě. Poté jsem sestavila měřicí trať a realizovala samotné měření.

Návrh a zhotovení experimentální měřicí tratě pro měření charakteristiky ventilu na vodní trati bylo provedeno v prostorách Vysoké školy Báňské – Technické univerzity v Ostravě, v laboratoři E306, Katedry hydromechaniky a hydraulických zařízení.



Obr. 6.1 Schéma měřicí tratě

Schéma zapojení měřicí tratě je patrné z obr. 6.1. Zkušební měřicí trať je tvořena těmito prvky: vodní nádrž (N), čerpadlo (HG), indukční průtokoměr (Q), měřený kulový ventil (KV), diferenční tlakový snímač (Δp) pro měření tlakové difference a uzavírací ventil (UV).

Princip funkce obvodu

Čerpadlo přivádí vodu z nádrže do obvodu. Indukčním průtokoměrem za čerpadlem se měří průtok vody. Před a za kulovým ventilem jsou umístěna odběrová místa tlaku, která vedou do diferenčního snímače tlaku. Odečtené hodnoty z průtokoměru a tlakoměru jsem zapisovala do tabulky. Za diferenčním snímačem tlaku je umístěn uzavírací ventil, kterým se reguluje průtok soustavou. Na uzavírací ventil je napojena hadice, která vede zpět do nádrže. Délka tratě od čerpadla k uzavíracímu ventilu je $l = 3,3m$. Trať je sestavena z plastových šroubovacích prvků. Tyto prvky jsem zvolila z důvodu univerzálnosti použití a skladnosti.



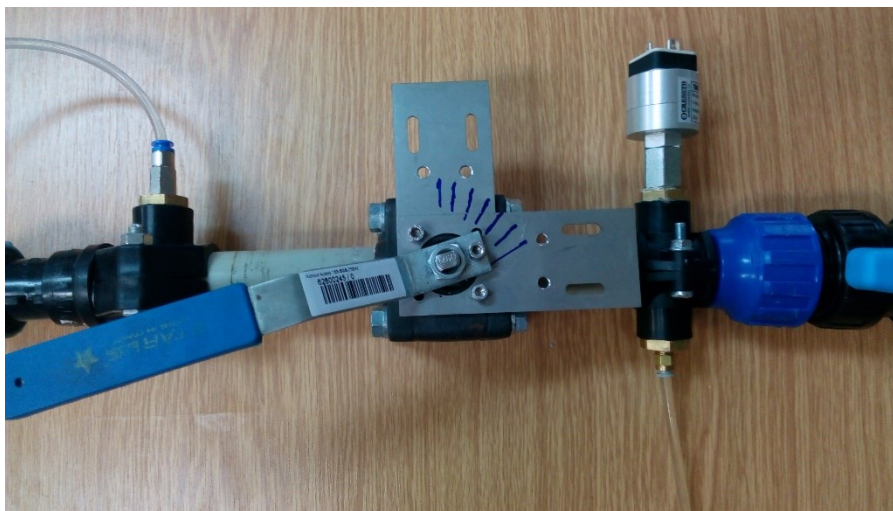
Obr. 6.2 Realizace měřicí tratě

Praktická realizace experimentální měřicí tratě včetně umístění použitých prvků (průtokoměr, kulový ventil, uzavírací ventil, U – trubice) je znázorněna na obr. 6.2.



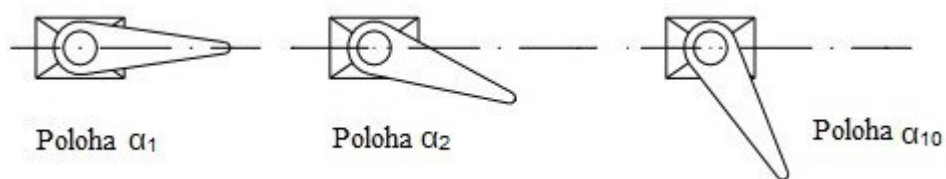
Obr. 6.3 Kulový ventil v poloze plně otevřen - $\alpha_I = 0^\circ$

Zapojení kulového ventilu a odběrových míst tlaku je patrné z obr. 6.3. Na ventilu jsou ryskami vyznačeny polohy, ve kterých jsem měřila charakteristiku ventilu. Kulový ventil na obr. 6.3 je nastaven v poloze α_I , tedy plně otevřen.



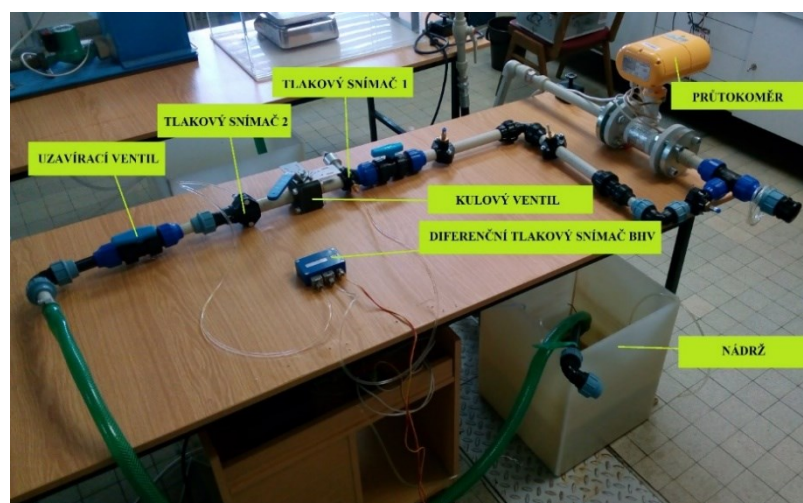
Obr. 6.4 Kulový ventil v poloze $\alpha_2 = 20^\circ$

Kulový ventil na obr. 6.4 je nastaven do polohy α_2 , odpovídající 20° . Dále je zde znázorněno zapojení kulového ventilu a napojení odběrových míst tlaku pomocí odběrných hadiček.



Obr. 6.5 Názorná ukázka poloh kulového ventilu

Nastavení poloh kulového ventilu je znázorněno na obr. 6.5. V poloze α_1 je kulový ventil plně otevřen, poloha α_2 odpovídá 20° otevření, poloha α_{10} odpovídá poslední měřené poloze kulového ventilu.



Obr. 6.6 Popis prvků na měřicí trati



Realizace experimentální měřicí tratě s popisem použitých prvků je znázorněna na obr. 6.6.

Na experimentální měřicí trati jsem měřila charakteristiku kulového ventilu. Měřenými veličinami byl objemový průtok Q [l/s] a tlaková difference Δp [Pa] na kulovém ventilu. Tyto hodnoty budou použity k dalšímu zpracování a vyhodnocení charakteristiky kulového ventilu. Tato trať byla navržena tak, aby prvky na experimentální měřicí trati splňovaly své funkce.

Prováděla jsem měření tlakové difference dvěma měřidly. První měření jsem realizovala pomocí diferenčního snímače tlaku Cressto SHD 511 P5UB D fungující na piezometrickém principu. Druhé experimentální měření pomocí U – trubice. U – trubice funguje na principu rozdílu hladin kapaliny. Pro měření průtoku jsem použila indukční průtokoměr FLONET FN 2014, který funguje na principu definovaném v kapitole 3.2.




6.1 Použité prvky a jejich specifikace

Pro měření charakteristiky ventilu na vodní trati byly použity tyto prvky:

<u>Čerpadlo (HG)</u>		
Výrobce:	WILO	
Typ:	TOP-S30/10	
Jmenovitá světlost:	DN 6/10	
Krytí:	IP 44	
Příkon:	$P_l = 390W; 385W;$	
Napájení:	$335W$ $230V/50Hz$	
<u>Indukční průtokoměr (Q)</u>		
Výrobce:	Elis Plzeň a.s.	
Typ:	FLONET FN 2014	
Příkon:	10 W	
Jmenovitá světlost:	DN 32	
Objemový průtok:	$Q_{min} = 0,3 m^3/h$ $Q_{max} = 30 m^3/h$	
Teplota měřené kapaliny:	$Do 150^{\circ}C$	

Obr. 6.7 Čerpadlo WILO

Obr. 6.8 Indukční průtokoměr

<u>Diferenční snímač tlaku</u>		
Výrobce:	Cressto	
Typ:	SHD 511 P5UB D	
Tlakový rozsah:	0 – 100 kPa 0 – 20 mA	
<hr/>		
<u>Kulový ventil (KV)</u>		
Výrobce:	FLUIDTECHNIK	
Typ:	BOHEMIA	
Světlost:	133 - SGS DN 08 - 100	
<hr/>		
<u>U – trubice (h)</u>		
Výrobce:	VŠB – TU Ostrava	
<hr/>		
<u>Nádrž (N)</u>		
Výrobce:	Valter Špalek – plexi	
Objem:	80 l	

Obr. 6.9 Diferenční snímač tlaku

Obr. 6.10 Kulový ventil (KV)

Obr. 6.11 U - trubice

6.2 Postup měření

- 1) Kontrola správné funkce a zvolení rozsahů měřidel
- 2) Sestavení obvodu – umístění čerpadla (HG), průtokoměru (Q), uzavíracího ventilu (UV), měřeného kulového ventilu (KV), diferenčního snímače tlaku, napuštění nádrže
- 3) Zapojení obvodu – připojení všech prvků do obvodu pomocí plastového potrubí
- 4) Zapojení snímačů – diferenčního snímače tlaku, průtokoměru
- 5) Zkušební provoz – zapnutí čerpadla, zkouška těsnosti obvodu
- 6) Odvzdušnění hadiček tlakového diferenčního snímače
- 7) Měření
 - a. Zapnutí čerpadla, průtokoměru, diferenčního tlakového snímače, kulový ventil v požadované poloze α_I = plně otevřen

- i. Uzavírací ventil je plně otevřený, po ustálení hodnot na měřidlech následuje odečtení hodnot z průtokoměru a tlakoměru a zapsání do tabulek
- ii. V další fázi se uzavírací ventil mírně přivírá a proces odečítání z měřidel se opakuje až do úplného uzavření uzavíracího ventilu
- b. Kulový ventil se takto postupně nastavuje až do polohy α_{10} a celý proces odečítání z měřidel se opakuje
- 8) Vypnutí měřidel, čerpadla
- 9) Uklizení pracoviště
- 10) Sepsání a vyhodnocení naměřených hodnot v programu EXCEL

7 Průběh měření a vyhodnocení

Na měřicí trati byl měřen tlakový spád Δp a objemový průtok Q , jak je popsáno v kap. 6. Následně jsem vyhodnotila $f = \Delta p(Q)$ charakteristiku kulového ventilu.

7.1 Měření charakteristiky ventilu diferenčním tlakoměrem

Po spuštění čerpadla (HG) a nastavení kulového ventilu do požadované polohy jsem uzavíracím ventilem (UV) postupně škrtila objemový průtok celého obvodu. Pro libovolné nastavení uzavíracího ventilu jsem vyhodnotila objemový průtok Q a tlakový spád Δp . Analogicky bylo postupováno v nastavení kulového ventilu do poloh $\alpha_1 - \alpha_{10}$. Po jednotlivých krocích jsem zapisovala hodnoty z průtokoměru (Q), který je umístěn na hlavní větvi obvodu, a z diferenčního snímače tlaku. Celkem bylo naměřeno pro každou polohu $\alpha_1 - \alpha_{10}$ několik hodnot, které jsou uvedeny v tab. 7.1 a v tab. 7.2. Následně byly tyto hodnoty graficky vyhodnoceny na obrázcích 7.4 a 7.5.

č.m.	Poloha α_1		Poloha α_2		Poloha α_3		Poloha α_4		Poloha α_5	
	Δp [Pa]	Q [l/s]	Δp [Pa]	Q [l/s]	Δp [Pa]	Q [l/s]	Δp [Pa]	Q [l/s]	Δp [Pa]	Q [l/s]
1	2100	1,0453	3050	1,015	10350	0,957	13500	0,913	21150	0,887
2	1800	1,0008	2950	1,006	10250	0,924	13300	0,899	20350	0,866
3	1750	0,9869	2750	0,976	9750	0,897	13000	0,894	20100	0,863
4	1500	0,8952	2650	0,937	8350	0,833	12500	0,878	19150	0,838
5	1350	0,8201	2350	0,884	7050	0,764	11800	0,851	17350	0,801
6	1150	0,745	2050	0,826	5350	0,663	11500	0,837	15850	0,768
7	950	0,6686	1850	0,773	4250	0,592	10050	0,785	13350	0,701
8	600	0,5254	1550	0,714	3950	0,568	9850	0,775	9650	0,599
9	350	0,367	1050	0,591	2450	0,440	11000	0,75	6050	0,471
10	250	0,2085	750	0,474	1450	0,344	8200	0,698	1950	0,269
11	150	0,0862	250	0,243	550	0,204	5800	0,599	400	0,115
12			50	0,121			2700	0,396		
13							300	0,114		

Tab. 7.1 Naměřené hodnoty pro polohy kulového ventilu $\alpha_1 - \alpha_5$

Naměřené hodnoty pro polohy $\alpha_1 - \alpha_5$ kulového ventilu jsou uvedeny v tab. 7.1. Měřenými veličinami byl tlakový spád Δp [Pa] a objemový průtok Q [l/s]. Pro nastavení poloh α_1 , α_3 a α_5 kulového ventilu jsem naměřila jedenáct hodnot, pro polohu α_2 jsem naměřila dvanáct hodnot a pro polohu α_4 jsem naměřila třináct hodnot. Z tabulky je patrné, jak s klesajícím objemovým průtokem Q klesá tlakový spád Δp .

č.m.	Poloha α_6		Poloha α_7		Poloha α_8		Poloha α_9		Poloha α_{10}	
	Δp [Pa]	Q [l/s]	Δp [Pa]	Q [l/s]	Δp [Pa]	Q [l/s]	Δp [Pa]	Q [l/s]	Δp [Pa]	Q [l/s]
1	34150	0,831	50850	0,743	67850	0,635	86500	0,490	98900	0,336
2	33850	0,826	47750	0,726	67400	0,629	84000	0,485	98600	0,333
3	32850	0,818	42500	0,686	65600	0,626	76800	0,462	98300	0,328
4	31750	0,805	35700	0,622	63400	0,607	74300	0,454	97300	0,330
5	30550	0,786	33600	0,609	58600	0,591	70500	0,442	96750	0,330
6	24850	0,711	27100	0,546	54150	0,566	64300	0,424	94850	0,328
7	13750	0,531	24000	0,514	51700	0,550	52700	0,382	93250	0,324
8	7150	0,379	14000	0,393	48800	0,537	40300	0,331	87750	0,314
9	2500	0,224	7700	0,289	42000	0,497	5000	0,114	73950	0,288
10	1350	0,173	400	0,045	19600	0,339			59250	0,256
11					900	0,063			21150	0,152

Tab. 7.2 Naměřené hodnoty pro polohy $\alpha_6 - \alpha_{10}$ kulového ventilu

Naměřené hodnoty pro polohy $\alpha_6 - \alpha_{10}$ kulového ventilu jsou uvedeny v tab. 7.2. Měřenými veličinami byl tlakový spád Δp [Pa] a objemový průtok Q [l/s]. Pro polohu α_6 a α_7 jsem naměřila deset hodnot, pro polohu α_8 a α_{10} jsem naměřila jedenáct hodnot, a pro polohu α_9 jsem naměřila devět hodnot.



Obr. 7.1 Poloha α_3

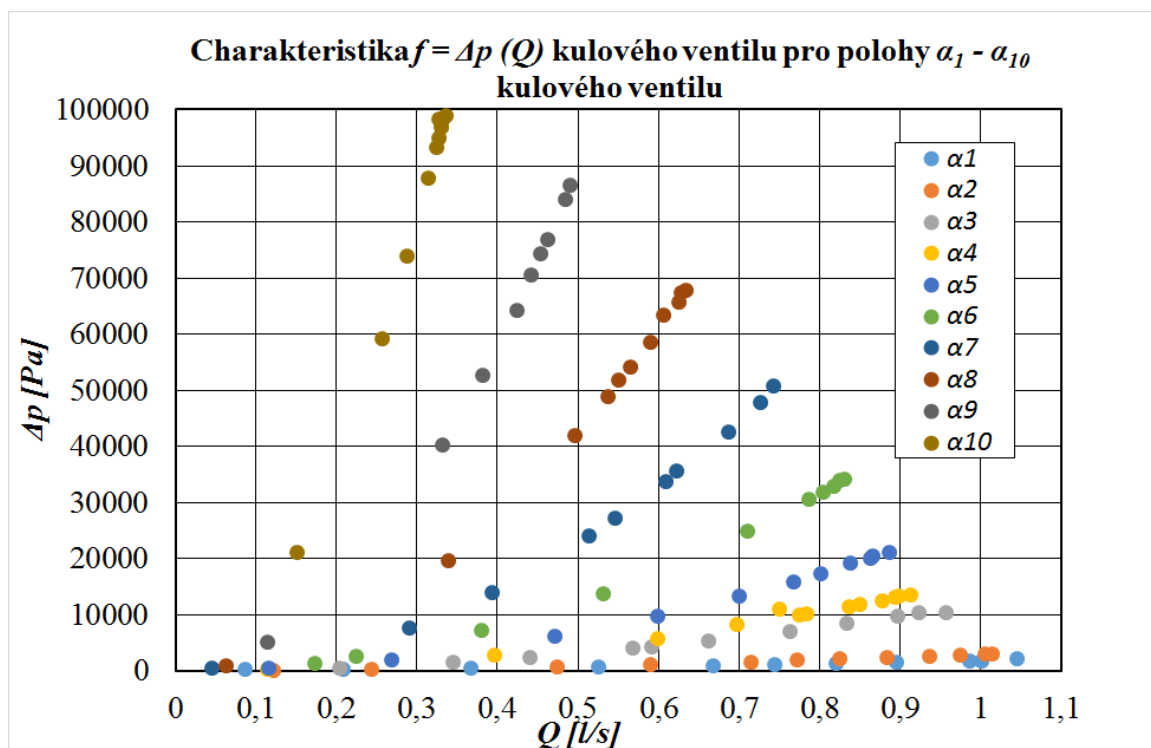


Obr. 7.2 Poloha α_5

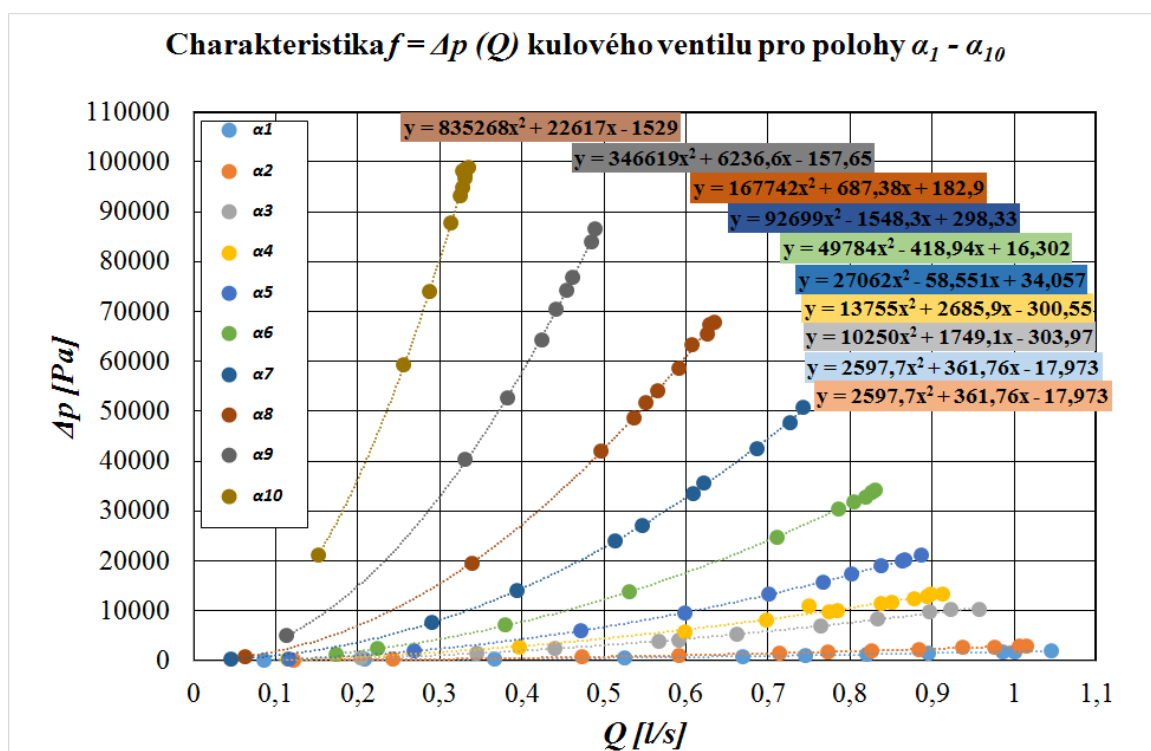


Obr. 7.3 Poloha α_{10}

Fyzická zapojení včetně nastavení polohy kulového ventilu na měřicí trati jsou znázorněny na obr. 7.1, obr. 7.2 a obr. 7.3. Ventil v poloze α_1 je plně otevřený (viz. obr. 7.1.). Ventil v poloze α_5 je částečně uzavřený (viz. obr. 7.2) a ventil v poloze α_{10} je téměř uzavřený (viz. obr. 7.3.). Výsledné charakteristiky kulového ventilu jsou znázorněny na obr. 7.4.



Obr. 7.4 Charakteristiky ($f = \Delta p(Q)$) kulového ventilu pro polohy $\alpha_1 - \alpha_{10}$



Obr. 7.5 Charakteristiky ($f = \Delta p(Q)$) kulového ventilu měřená pro polohy $\alpha_1 - \alpha_{10}$

Následně jsou charakteristiky kulového ventilu proloženy polynomy druhého řádu, viz obr. 7.5. Grafy na obr. 7.4 a obr. 7.5 znázorňují charakteristiky $f = \Delta p(Q)$ pro nastavení poloh $\alpha_1 - \alpha_{10}$ kulového ventilu. Rozsah měřeného tlakového spádu Δp

je $0 - 100 \text{ kPa}$, rozsah objemového průtoku Q je $0 - 1,2 \text{ l/s}$. Detailní zobrazení charakteristiky kulového ventilu je uvedeno v přílohách.

7.2 Měření charakteristiky ventilu U – trubicí

Na stejné experimentální měřicí trati proběhlo druhé měření, kdy místo diferenčního snímače tlaku byla použita U – trubice. Měření probíhalo stejným způsobem jako v případě použití diferenčního snímače tlaku.

Po spuštění čerpadla (HG) a ustálení průtoku a tlaku pro různé polohy nastavení kulového ventilu se po krocích odečítaly hodnoty z průtokoměru (Q) a rozdíl výšek hladiny z U – trubice. Hodnoty Δh se dosadily do následujícího vztahu. Výsledná hodnota tlakového spádu Δp se zjistí z následující rovnice:

$$\Delta p = \Delta h \cdot \rho \cdot g \quad (8.1)$$

$$\Delta p = 0,187 \cdot 1000 \cdot 9,81 = 1834,47 \text{ [Pa]} \quad (8.2)$$

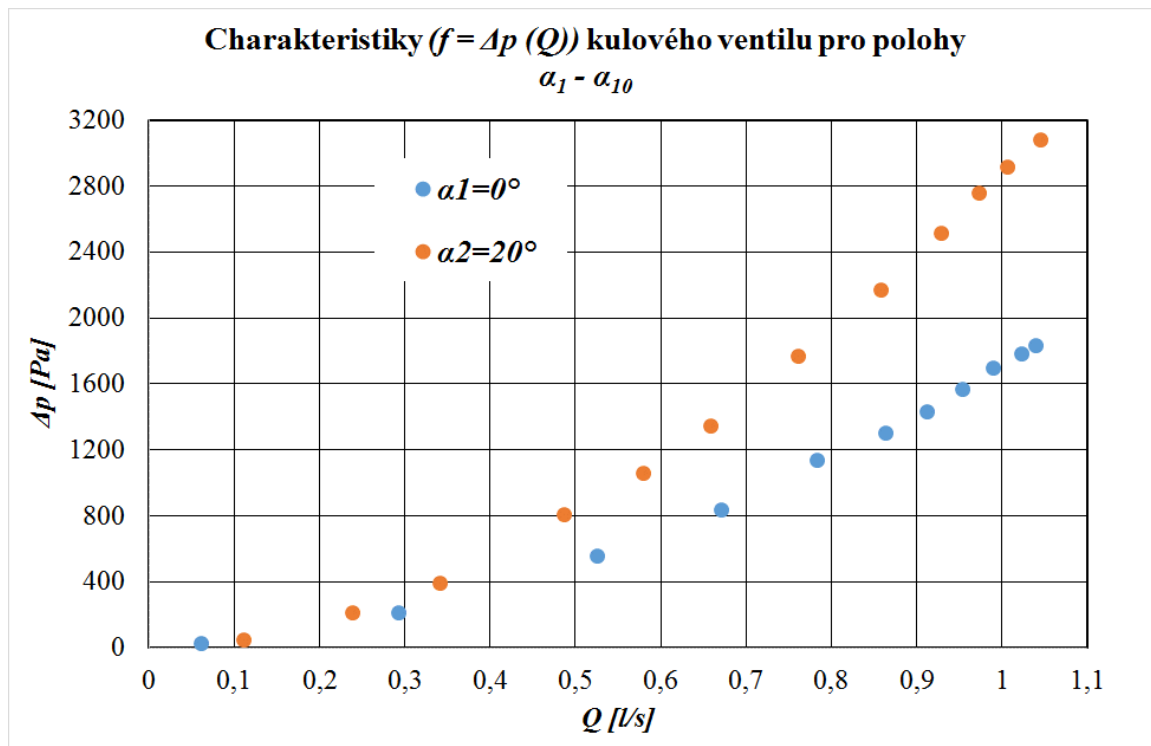
Vzorec č. 8.2 znázorňuje výpočet měření č. 1 z tab. 7.3.

	Měření U - trubicí						Měření snímačem			
	Poloha α_1			Poloha α_2			Poloha α_1		Poloha α_2	
č.m.	$\Delta h \text{ [m]}$	$\Delta p \text{ [Pa]}$	$Q \text{ [l/s]}$	$\Delta h \text{ [m]}$	$\Delta p \text{ [Pa]}$	$Q \text{ [l/s]}$	$\Delta p \text{ [Pa]}$	$Q \text{ [l/s]}$	$\Delta p \text{ [Pa]}$	$Q \text{ [l/s]}$
1	0,187	1834,47	1,039	0,314	3080,34	1,045	2100	1,045	3050	1,014
2	0,182	1785,42	1,023	0,297	2913,57	1,006	1800	1,001	2950	1,006
3	0,173	1697,13	0,989	0,281	2756,61	0,973	1750	0,987	2750	0,976
4	0,16	1569,6	0,953	0,256	2511,36	0,928	1500	0,895	2650	0,937
5	0,146	1432,26	0,911	0,221	2168,01	0,859	1350	0,820	2350	0,884
6	0,133	1304,73	0,863	0,18	1765,8	0,761	1150	0,745	2050	0,826
7	0,116	1137,96	0,783	0,137	1343,97	0,658	950	0,669	1850	0,773
8	0,085	833,85	0,671	0,108	1059,48	0,579	600	0,525	1550	0,714
9	0,057	559,17	0,525	0,082	804,42	0,486	350	0,367	1050	0,591
10	0,022	215,82	0,292	0,04	392,4	0,341	250	0,209	750	0,474
11	0,003	29,43	0,061	0,022	215,82	0,239	150	0,086	250	0,243
12				0,005	49,05	0,111	2100	1,045	50	0,1215

Tab. 7.3 Naměřené hodnoty U – trubicí a diferenčním snímačem tlaku

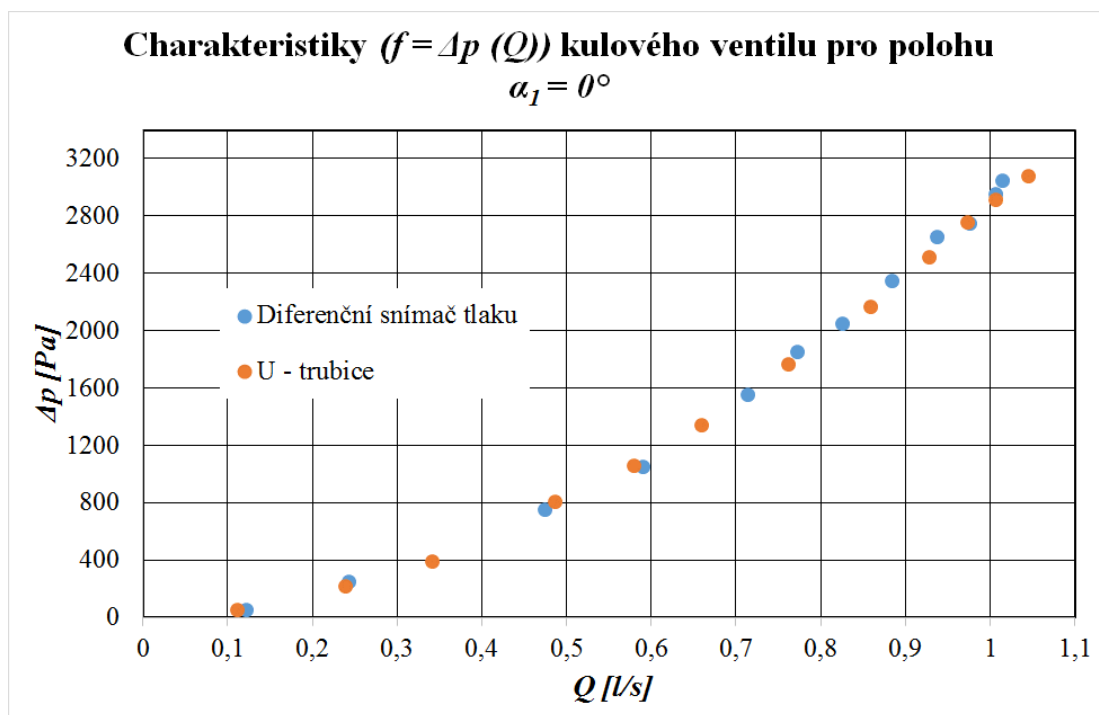
Naměřené hodnoty U - trubicí pro dvě polohy nastavení kulového ventilu jsou uvedeny v tab. 7.3. V tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty rozdílu výšek hladiny Δh tekutiny v U – trubicí, dále tlakového spádu $\Delta p \text{ [Pa]}$ a objemového průtoku $Q \text{ [l/s]}$. Pro polohu

α_1 jsem naměřila jedenáct hodnot a pro polohu α_2 jsem naměřila dvanáct hodnot. Tabulka je doplněna o měření z kap. 7.1, viz tab. 7.1.



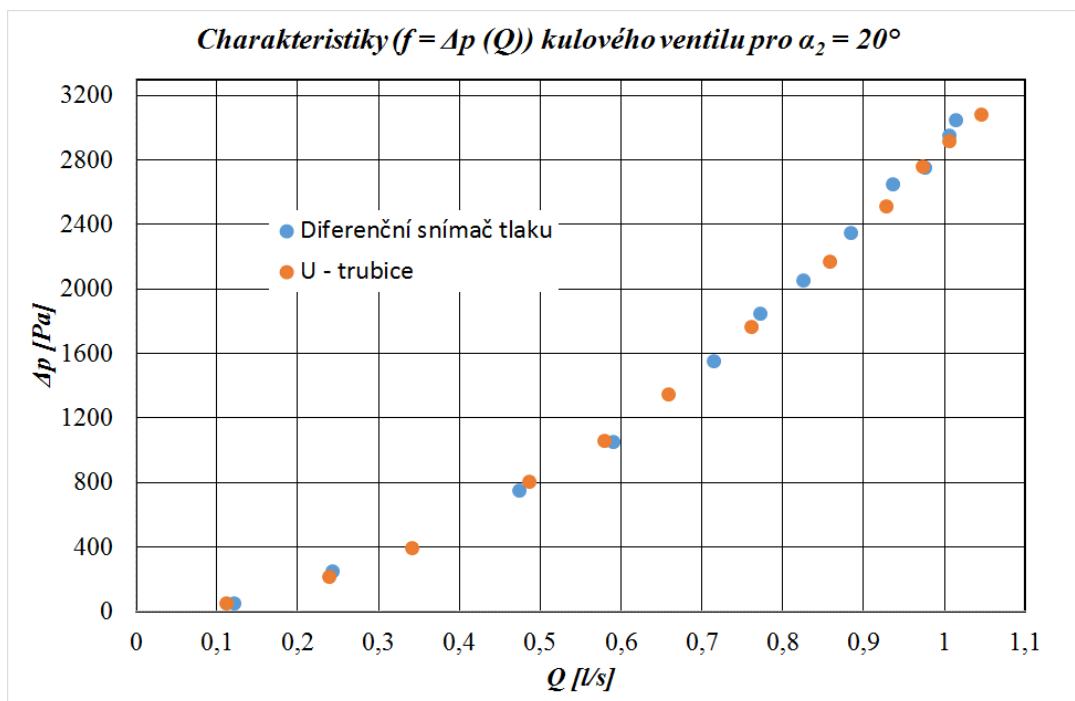
Obr. 7.6 Charakteristiky ($f = \Delta p(Q)$) kulového ventilu měřena U - trubicí

Grafická závislost tlakového spádu Δp [Pa] na objemovém průtoku Q [l/s] je znázorněna na obr. 7.6. Rozsah měřeného tlaku Δp je 0 - 3,2 kPa a rozsah objemového průtoku Q je 0 - 1,1 l/s. U - trubicí byly měřeny hodnoty pouze pro dvě polohy kulového ventilu, z důvodu omezeného rozsahu stupnice U – trubice.



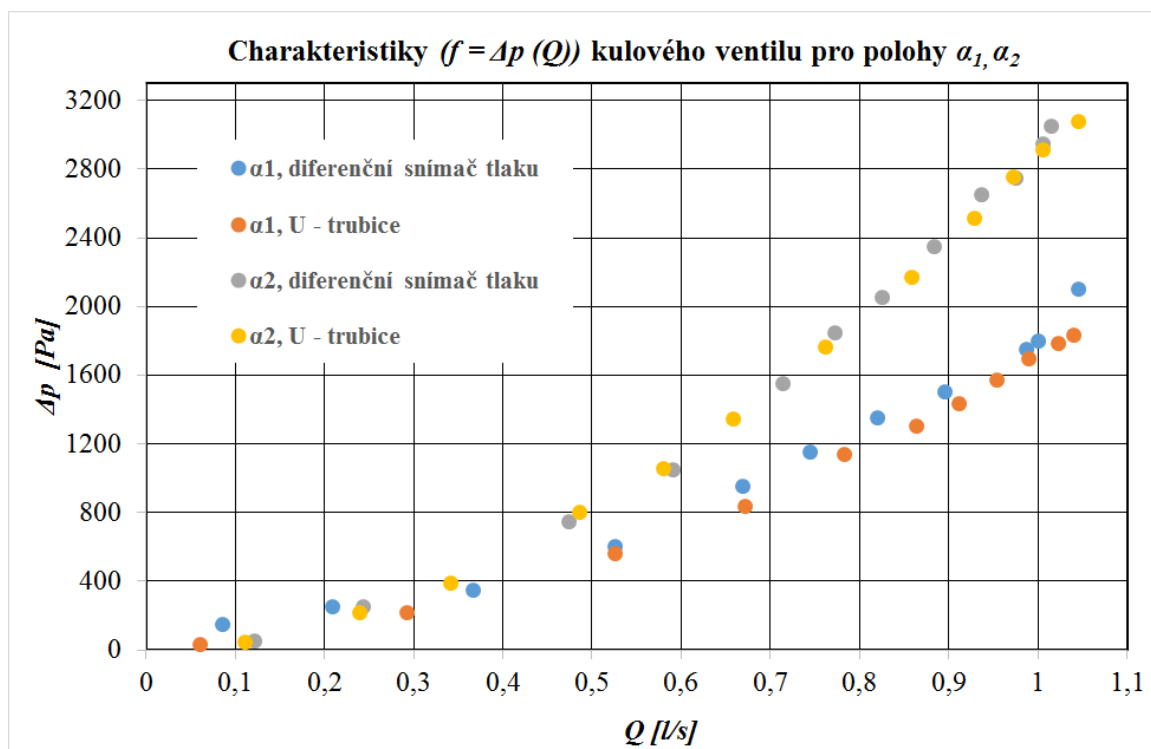
Obr. 7.7 Charakteristiky ($f = \Delta p(Q)$) kulového ventilu měřena U – trubicí a diferenčním snímačem tlaku

Grafická závislost charakteristiky kulového ventilu měřena U – trubicí a diferenčním snímačem tlaku v poloze plně otevřeného ventilu $\alpha_1 = 0^\circ$ je znázorněna na obr. 7.7. Rozsah měřeného tlaku Δp je $0 - 3,2 \text{ kPa}$ a rozsah objemového průtoku Q je $0 - 1,1 \text{ l/s}$.



Obr. 7.8 Charakteristiky ($f = \Delta p(Q)$) kulového ventilu pro polohu $\alpha_2 = 20^\circ$ měřena diferenčním snímačem tlaku a U – trubicí

Grafická závislost charakteristiky kulového ventilu pro polohu $\alpha_2=20^\circ$ měřená diferenčním tlakoměrem a U – trubicí je znázorněna na obr. 7.8. Rozsah měřeného tlaku Δp je $0 - 2,1 \text{ kPa}$ a rozsah měřeného objemového průtoku Q je $0 - 1,1 \text{ l/s}$.



Obr. 7.9 Charakteristiky ($f = \Delta p (Q)$) kulového ventilu pro polohy α_1 a α_2

Vzájemné porovnání charakteristik kulového ventilu pro polohy α_1 a α_2 změřených diferenčním snímačem tlaku a U – trubicí je znázorněno na obr. 7.9. Rozsah měřeného tlakového spádu Δp je $0 - 3,1 \text{ kPa}$ a rozsah měřeného objemového průtoku Q je $0 - 1,2 \text{ l/s}$. Z obr. 7.9 a tab. 7.3 je zřejmé, že největší rozdíl tlakového spádu Δp mezi měřením charakteristiky kulového ventilu diferenčním snímačem tlaku a měřením charakteristiky ventilu U - trubicí je pro nastavení v poloze α_1 v prvním měření (rozdíl odpovídá hodnotě $265,53 \text{ Pa}$). V případě měření charakteristiky kulového ventilu pro nastavení ventilu v poloze α_2 je tento rozdíl v sedmém měření (rozdíl odpovídá hodnotě $506,03 \text{ Pa}$).

8 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo experimentální stanovení charakteristiky kulového ventilu na vodní trati. Toto měření jsem realizovala na měřicí trati sestavené ve školní laboratoři E306 Vysoké školy Báňské – Technické Univerzity v Ostravě, katedry Hydromechaniky a hydraulických zařízení.

Teoretická část této práce se v druhé kapitole zabývá fyzikálními vlastnostmi kapalin. Třetí kapitola je zaměřena na charakteristiku měření průtoku, charakteristiku měření místní a střední rychlosti a charakteristiky měření tlaku. Na tyto kapitoly navazuje problematika zabývající se typy řídicích prvků v hydraulických systémech a charakteristikou měření hydraulických ztrát (třecí a místní ztráty). Dále navazuje popis měření charakteristiky ventilu na vodní trati z odborné literatury.

Praktická část se zabývá návrhem samotné experimentální měřicí tratě včetně popisu použitých měřicích zařízení (viz. obr. 6.6) a měřeného prvku (kulový ventil). Byla sestavena základní trať, u které byl tlakový spád Δp vyhodnocen diferenčním snímačem tlaku SHD a objemový průtok Q indukčním průtokoměrem FLONET. Další měření tlakového spádu Δp bylo realizováno na stejné měřicí trati U – trubicí. Vyhodnocení charakteristiky kulového ventilu bylo provedeno pro několik poloh nastavení ventilu. Pro každou polohu byl regulován objemový průtok Q uzavíracím ventilem a hodnoty z průtokoměru a diferenčního snímače tlaku byly zapisovány do tabulek. Rozsah měřeného tlakového spádu Δp byl $0 - 100 \text{ kPa}$ a rozsah měřeného objemového průtoku Q byl $0 - 1,2 \text{ l/s}$. Měření pomocí diferenčního snímače tlaku probíhalo v deseti polohách nastavení kulového ventilu. Měření pomocí U – trubice bylo realizováno v poloze plně otevřeného ventilu α_1 a v poloze $\alpha_2 = 20^\circ$. U – trubicí byly naměřeny pouze dvě hodnoty nastavení poloh (α_1 a α_2) kulového ventilu z důvodu omezeného rozsahu stupnice U – trubice.

Závislost objemového průtoku na tlakovém spádu je zřejmá z tab. 7.1, 7.2 a z obr. 7.4. Výsledné měřené charakteristiky vykazují poměrně dobrou shodu (viz. obr. 7.9). Z těchto závislostí je zřejmé, že s klesajícím objemovým průtokem Q klesá tlakový spád Δp pro libovolné nastavení poloh ($\alpha_1 - \alpha_{10}$) kulového ventilu. Dále je patrné, že pro stejný objemový průtok Q v různých nastaveních poloh kulového ventilu, roste tlakový spád Δp .

V závěru (kap. 7.2) jsem vyhodnotila charakteristiku kulového ventilu měřenou pomocí diferenčního snímače tlaku a U – trubicí, kdy jsem porovnála změřené hodnoty pro nastavení polohy kulového ventilu α_1 a α_2 . V poloze α_1 pro měření diferenčním snímačem tlaku a U – trubicí se průtok a tlakový spád mírně liší. Obdobný závěr lze konstatovat i pro polohu nastavení kulového ventilu α_2 . Maximální rozdíl hodnot tlakového spádu Δp v poloze nastavení kulového ventilu α_1 v případě měření diferenčním snímačem tlaku a U – trubicí odpovídá hodnotě $265,53 Pa$.

9 Seznam použité literatury

- [1] PAVLOK, B. *Hydraulické prvky a systémy Díl 2*. VŠB - TU Ostrava. 2008.
- [2] JANDORA, J., STARA, V., STARÝ, M. *Hydraulika a hydrologie*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, Brno 2011.
- [3] DVOŘÁK, L. *Vlastnosti tekutin*. Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení. [online]. Ostrava 2010.
<http://www.338.vsb.cz/PDF/vlastnosti%20tekutin.pdf>
- [4] FAJKA, M. *Měření ztrát v nízkotlakém hydraulickém systému s uvažováním hydrostatického tlaku*. Ostrava: VŠB – TUO. Ostrava 2015.
- [5] HRUŽÍK, D. I. *Experimentální úlohy v tekutinových mechanizmech*. [online]. Ostrava 2008.
<http://www.338.vsb.cz/PDF/Experimentalniulohyvtekutinovychmechanizmech.pdf>
- [6] MATOUŠEK, V., PICEK, T. Katedra hydrauliky a hydrologie. [online]. 2015.
http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HYAR/ke_stazeni/prednasky/HYAR_pr_12.pdf
- [7] SMYČEK, O. *Regulační a bezpečnostní prvky hydraulických obvodů*. Vysoké učení technické v Brně. Brno 2014.
- [8] ROČEK, J. *Průmyslové armatury, Teorie a praxe*. SNTL - Nakladatelství technické literatury. Praha 1975.
- [9] BOSÁK, J. *Měření součinitele místních ztrát různých ventilů na vzduchové trati*. VŠB – TU Ostrava. Ostrava 2011.
- [10] LAZORIŠÁK, L. *Měření ztrát na T-kusu při změnách směru proudění na vodní trati*. VŠB - TUO. Ostrava 2014.
- [11] DRÁBKOVÁ, S. a kolektiv. *Mechanika tekutin*. Ostrava. 2007, 257 s.

10 Seznam příloh

Příloha A – Charakteristiky kulového ventilu pro polohy α_1 - α_{10}

Příloha B – Charakteristiky kulového ventilu pro polohy α_1 - α_5

Příloha C – Naměřené hodnoty pro nastavení poloh α_1 - α_{10}